

# بهبود عملکرد حفاظت مقایسه فاز در خطاهای با جریان اتصالی کوچک با استفاده از تخمین مؤلفه جریان بار

مجید صنایع‌پسند و میثم جعفری نوکندی

حفاظت واحد<sup>1</sup> (یا پایلوت<sup>2</sup>) به‌عنوان روشی مناسب برای حل بسیاری از مشکلات حفاظت دیستانس ارائه شده‌اند [1] تا [6]. این روش‌ها مبتنی بر ارتباط بین رله‌ها از طریق کانال مخابراتی بوده و در آنها برای تعیین داخلی یا خارجی بودن خطا از اطلاعات هر دو طرف خط استفاده می‌شود. به‌همین دلیل این روش‌ها دارای سرعت و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به حفاظت متداول دیستانس می‌باشند. سیستم‌های حفاظت پایلوت دارای انواع مختلفی هستند و برای پیاده‌سازی آنها می‌توان از روش‌های مبتنی بر حفاظت دیستانس، دیفرانسیل جریان، مقایسه فاز، مقایسه جهت و سایر روش‌های موجود استفاده کرد [7].

یکی از روش‌های حفاظت واحد، روش مقایسه فاز است که در آن با مقایسه فاز جریان‌های ورودی به دو سمت خط، وقوع خطا و داخلی یا خارجی بودن آن تعیین می‌شود. روش مقایسه فاز به‌دلیل عدم حساسیت آن نسبت به بسیاری از مسائل مشکل‌ساز برای حفاظت دیستانس مانند نوسان توان، خطوط کوتاه، خطوط موازی، خطوط جبران‌شده با خازن سری، خطوط چندترمیناله و ... یکی از مؤثرترین روش‌های حفاظت واحد است که قابلیت اطمینان بالایی دارد و عملکرد آن در مقالات متعددی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [8] و [9]. علی‌رغم عملکرد مناسب روش مقایسه فاز در بسیاری از شرایط سیستم، این روش مشکلاتی نیز دارد که عمدتاً مربوط به جریان بار و جریان شارژ خازن‌های موازی خط است. بزرگ‌ترین مشکل روش مقایسه فاز در مواردی است که خطا با جریان اتصالی کوچک (در مقایسه با جریان بار) رخ می‌دهد. در این شرایط، روش مقایسه فاز قادر به تشخیص خطای داخلی نیست [2] تا [4] و [10]، و در نتیجه نیاز به بهبود این روش و افزایش توانایی آن در تشخیص چنین خطاهایی وجود دارد.

از طرف دیگر در چند دهه اخیر با پیشرفت سریع و خارق‌العاده تکنولوژی دیجیتال و افزایش قابلیت اطمینان و دقت عملکرد پردازشگرهای دیجیتال و ریزپردازنده‌ها، امکان پردازش حجم زیادی از محاسبات در بازه زمانی کوتاهی فراهم شده است. این مسأله منجر به طراحی رله‌های جدید و پیچیده مبتنی بر میکروپروسورها شده است و در کنار آن، طراحی و توسعه طرح‌های حفاظت دیجیتال برای سیستم‌های قدرت مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است [11] تا [21]. قابلیت‌های زیاد رله‌های دیجیتال و انعطاف‌پذیری بسیار بالای آنها برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های مختلف حفاظت دیجیتال نظیر روش‌های فوریه، حداقل مربعات خطا، معادلات دیفرانسیل و حتی الگوریتم‌های پیچیده‌تر، موجب شده است تا بتوان بسیاری از مشکلاتی را که رله‌های الکترومکانیکی قدیمی قادر به حل آنها نیستند با به‌کارگیری الگوریتم‌های مناسب برطرف ساخت [6]. در این مقاله نیز با توجه به قابلیت‌های رله‌های دیجیتال، یک

چکیده: در خطاهای با جریان اتصالی کوچک، جریان بار تأثیر زیادی بر اختلاف فاز میان جریان‌های دو سر خط دارد و حفاظت مقایسه فاز معمولاً قادر به تشخیص این‌گونه خطاها نیست. در این مقاله یک روش برای بهبود عملکرد مقایسه فاز در اتصالی‌های با جریان اتصالی کوچک پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی با تقریب‌زدن فازور جریان بار و کسر آن از جریان خطا، مؤلفه‌های واقعی جریان اتصال کوتاه به‌طور تقریبی بازسازی می‌شوند و در نتیجه، روش پیشنهادی اختلاف فاز ناشی از جریان بار را تا حد زیادی حذف می‌کند. از جریان قبل از خطای خط به‌عنوان تخمین جریان بار در زمان اتصال کوتاه استفاده شده است. نشان داده شده است که این فرض تقریبی در اتصالی‌های با جریان خطای کوچک، عملکرد حفاظت مقایسه فاز را بهبود می‌بخشد. ضمن آنکه روش پیشنهادی با افزایش حساسیت واحدهای تشخیص وقوع خطا در رله‌ها، تعیین نوع خطا را نیز با دقت بیشتری امکان‌پذیر می‌سازد. روش پیشنهادی در یک سیستم نمونه شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده بهبود قابل توجه عملکرد حفاظت مقایسه فاز با استفاده از روش پیشنهادی می‌باشد.

کلید واژه: بازسازی مؤلفه اتصال کوتاه، جریان اتصالی، جریان بار، حفاظت مقایسه فاز.

## 1- مقدمه

سیستم‌های قدرت جدید به‌منظور استفاده بهینه از ظرفیت ادوات سیستم، نزدیک‌تر به حاشیه پایداری خود کار می‌کنند. تجدید ساختار صنعت برق و خصوصی‌سازی سیستم‌های تولید و انتقال نیز موجب تشدید این روند گردیده است و بسیاری از خطوط انتقال در نزدیکی حد انتقال توان خود بارگیری می‌شوند [1]. برای بهبود پایداری گذرا، کاهش آسیب ناشی از اتصالی و خطا، حداقل شدن زمان خروج ادوات سیستم و بهبود کیفیت توان، نیاز به برطرف شدن سریع و صحیح خطا وجود دارد و در نتیجه، رله‌های حفاظتی و روش‌های حفاظت شبکه دارای نقشی حیاتی برای سیستم‌های قدرت شده‌اند، چرا که عملکرد آنها تعیین‌کننده پاسخ سیستم در مواجهه با وقوع خطا می‌باشد [2].

روش‌های متداول حفاظت خطوط انتقال از قبیل روش دیستانس تنها از اطلاعات یک طرف خط برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند و در نتیجه، این روش‌ها در بسیاری از موارد قادر به برطرف‌ساختن سریع تمام خطاهای خط انتقال از دو طرف آن نیستند. در این میان روش‌های

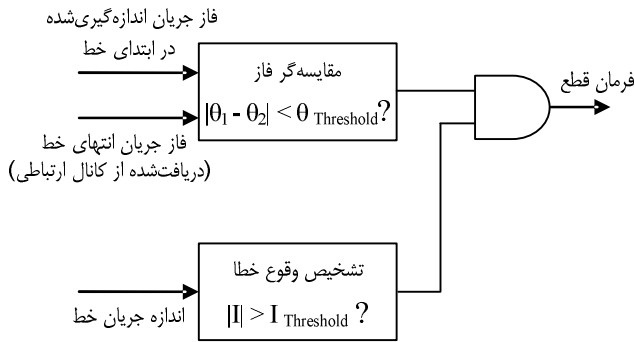
این مقاله در تاریخ 10 مهر ماه 1386 دریافت و در تاریخ 21 اسفند ماه 1386 بازنگری شد.

مجید صنایع‌پسند، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، خیابان کارگر شمالی، تهران کدپستی 14395/515 (email: msanaye@chamran.ut.ac.ir).

میثم جعفری نوکندی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران (email: m.jaefarini@ece.ut.ac.ir).

1. Unit Protection

2. Pilot Protection



شکل 2: منطق عملکرد رله‌ها در روش مقایسه فاز.

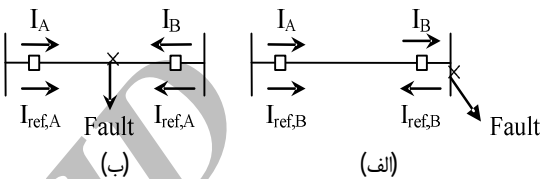
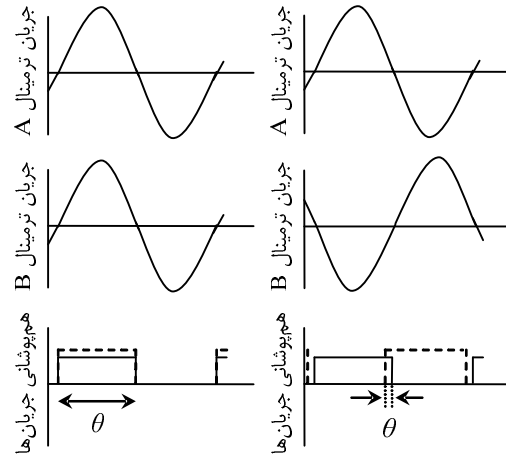
نوعی کانال مخابراتی وجود دارد. البته برای افزایش امنیت<sup>1</sup> روش مقایسه فاز و عدم تریب اشتباه در حالت‌های گذرای از سیستم که ممکن است اختلاف فاز بین جریان‌ها برای مدت کوتاهی تغییر کند، مطابق شکل 2 از یک واحد تشخیص‌دهنده وقوع خطا<sup>2</sup> (FD) نیز استفاده می‌شود. خروجی این واحد که با خروجی مقایسه‌گر فاز، AND منطقی شده است زمانی فعال می‌شود که اندازه جریان خطا برای مدت معینی از حد آستانه مشخص شده بیشتر باشد و پس از آن است که خروجی مقایسه‌گر فاز، تعیین‌کننده محل خطا در داخل یا خارج ناحیه حفاظتی خواهد بود. البته استفاده از واحد تشخیص خطا موجب می‌شود که در برخی از خطاها که با جریان اتصالی کوچک همراه هستند، روش مقایسه فاز نتواند وقوع خطا را تشخیص داده و قطع کند که این مشکل نیز با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله تا حد زیادی برطرف می‌شود.

در سیستم قدرت واقعی، میزان اختلاف فاز جریان‌ها در اتصالی‌های داخلی و خارجی از مقادیر حالت ایده‌آل فاصله می‌گیرد که این مسأله عمدتاً ناشی از جریان شارژ خازن موازی خط، زمان تأخیر سیگنال مخابراتی و وجود جریان بار است. جریان شارژ خازن به دلیل هم‌فاز بودن تقریبی ولتاژ باس‌های ابتدا و انتهای خط موجب کاهش اختلاف فاز جریان‌ها در اتصالی‌های خارجی می‌شود که میزان خطای فوق با افزایش طول خط و افزایش جریان شارژ خازن بیشتر می‌شود. تأخیر سیگنال‌های مخابراتی نیز در صورت عدم جریان زمان تأخیر کانال موجب می‌شود که میزان هم‌پوشانی یا عدم هم‌پوشانی جریان‌های دو طرف خط از حالت ایده‌آل خارج شود و در نتیجه معیار هم‌پوشانی کامل یا عدم هم‌پوشانی کامل که در حالت ایده‌آل برای اتصالی‌های داخلی و خارجی فرض می‌شود قابل استفاده نباشد و بایستی تنظیم کمتری به‌کار رود.

جریان بار نیز عامل دیگری در عدم برقراری شرایط ایده‌آل برای روش مقایسه فاز است، زیرا در اتصالی‌های داخلی که جریان بار در مقایسه با جریان اتصالی قابل ملاحظه باشد، اختلاف فاز بین جریان‌ها را افزایش می‌دهد. در واقع جریان بار مهم‌ترین مشکل حفاظت مقایسه فاز در خطوط انتقال است و در شرایط بارگیری سنگین سیستم و یا وقوع اتصالی با مقاومت خطای بزرگ، امکان عملکرد اشتباه و عدم تشخیص خطا وجود دارد. اما روش پیشنهادی در این مقاله، با تقریب‌زدن جریان بار و بازسازی تقریبی جریان واقعی اتصال کوتاه، موجب بهبود بسیار زیادی در عملکرد روش مقایسه فاز تحت این شرایط می‌شود.

با توجه به روش‌هایی که برای ترکیب یا عدم ترکیب سیگنال‌های دریافتی از سه فاز ابتدا و انتهای خط وجود دارد، سه طرح اصلی برای پیاده‌سازی مقایسه فاز مطرح می‌باشد [9] تا [12] که عبارت است از:

1. Security
2. Fault Detection Unit



شکل 1: نحوه مقایسه اختلاف فاز جریان‌های دو سر خط، (الف) خطای داخلی و (ب) خطای خارجی.

روش جدید و ساده مبتنی بر تقریب‌زدن فازور جریان ارائه شده است که با استفاده از آن، مشکل روش مقایسه فاز در مواجهه با اتصالی‌های با مقاومت خطای بزرگ برطرف می‌شود. این روش جدید، با تخمین جریان بار و بازسازی مؤلفه واقعی جریان اتصال کوتاه با تقریبی قابل قبول، امکان تشخیص خطاهای با مقاومت خطای بزرگ را به‌سادگی فراهم می‌آورد. ضمن آنکه در اتصالی‌های با مقاومت خطای کوچک و جریان اتصالی بزرگ نیز مانع عملکرد صحیح رله‌ها نمی‌شود. علاوه بر این، استفاده از روش جدید موجب افزایش حساسیت واحدهای تشخیص خطا نیز می‌شود. تخمین سیگنال‌های جریان و محاسبه اندازه و فاز آنها در این روش با استفاده از الگوریتم فوریه تمام سیکل انجام شده است.

در بخش دوم مقاله، مفهوم روش مقایسه فاز بیان شده و در بخش سوم، روش پیشنهادی برای بهبود حفاظت مقایسه فاز تشریح گردیده است. روش پیشنهادی در یک سیستم نمونه شبیه‌سازی شده و در انتها نیز به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

## 2- حفاظت مقایسه فاز

مقایسه فاز، نوعی حفاظت پابلوت است که زوایای جریان‌های واردشونده به یک ترمینال خط انتقال را با زوایای جریان‌های واردشونده به سر دیگر همان خط مقایسه می‌کند [5] و [6]. شکل 1، مفهوم روش مقایسه فاز را نشان می‌دهد. مطابق شکل 1-الف و با توجه به جهت مرجع برای رله‌های دو طرف خط، خطای ایجادشده در ناحیه حفاظتی (اتصالی داخلی)، موجب عبور جریان‌های تقریباً هم‌فاز از ترمینال‌ها خواهد شد. در حالی که مطابق شکل 1-ب، در خطای خارج از ناحیه حفاظتی و یا عبور جریان بار در حالت عادی عملکرد سیستم، جریان‌های واردشونده به یک ترمینال تقریباً دارای 180 درجه اختلاف فاز با جریان‌های واردشونده به ترمینال دیگر هستند. طرح حفاظتی مقایسه فاز، دربرگیرنده مقایسه این اختلاف فازها و تریب‌دادن به بریکرهای مربوطه در حالت خطای داخلی است.

از آنجا که ترمینال‌های خطوط انتقال کیلومترها با هم فاصله دارند، برای ارتباط بین دو سر خطوط انتقال و انجام چنین مقایسه‌ای نیاز به

### 3- شرح روش پیشنهادی برای بهبود عملکرد حفاظت مقایسه فاز

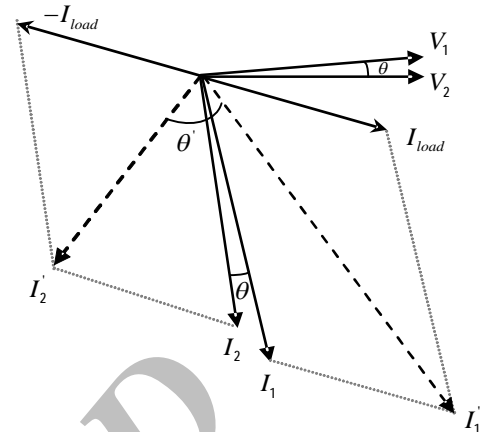
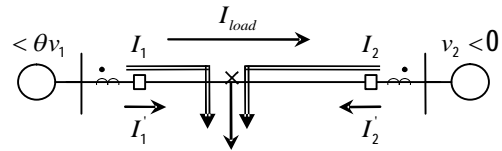
همان‌طور که اشاره شد، مشکل اصلی حفاظت مقایسه فاز، حضور جریان بار خصوصاً در خطاهای با جریان اتصالی کوچک می‌باشد. زیرا در این شرایط جریان بار باعث افزایش اختلاف فاز میان جریان‌های دو سر خط می‌شود. شکل 3 این مسأله را به خوبی نشان می‌دهد.

با چشم‌پوشی از خازن موازی خط در این شکل،  $I_1$  و  $I_2$  فازور جریان‌های دو سر خط در حالت ایده‌آل برای یک خطای داخلی می‌باشند که با فرض هم‌فاز بودن تقریبی ولتاژ منابع با یکدیگر ( $\theta \approx 0$ )، این جریان‌ها نیز تقریباً هم‌فاز خواهند بود. اگر  $I_{load}$  مؤلفه جریان بار - از کل جریان اتصال کوتاه - باشد مشاهده می‌شود که جریان‌های واقعی خط یعنی  $I_1' = I_1 + I_{load}$  و  $I_2' = I_2 - I_{load}$  که در دو سر خط اندازه‌گیری می‌شوند در اثر وجود مؤلفه مربوط به جریان بار دارای اختلاف فاز بیشتری ( $\theta'$ ) شده‌اند. هرچه اندازه مؤلفه جریان بار در مقایسه با مؤلفه‌های ناشی از اتصال کوتاه بیشتر باشد این اختلاف فاز بیشتر است. خصوصاً در اتصالی‌های تک‌فاز به زمین که اکثر خطاها را تشکیل می‌دهند [22]، معمولاً هم جریان اتصالی نسبت به اتصالی دوفاز و سه‌فاز کوچک‌تر است و هم مؤلفه جریان بار، بزرگ‌تر از جریان بار در حالت اتصالی سه‌فاز می‌باشد و بنابراین بیشترین مشکل حفاظت مقایسه فاز برای این‌گونه خطاها وجود دارد. با توجه به شکل 3 مشخص است که اگر به‌طریقی بتوان جریان‌های اصلی اتصال کوتاه ( $I_1$  و  $I_2$ ) را از روی جریان‌های اندازه‌گیری شده ( $I_1'$  و  $I_2'$ ) به‌دست آورد، در این صورت اختلاف فاز میان جریان‌ها مستقل از جریان بار بوده و به‌زای خطاهای داخلی، مقدار خیلی کمی خواهد داشت.

مطابق شکل 3 اگر فازور  $I_{load}$  را داشته باشیم با کم کردن آن به‌صورت برداری از جریان‌های اندازه‌گیری شده، مؤلفه‌های واقعی خطای اتصال کوتاه به‌دست خواهند آمد. اما در عمل، محل خطا و مقاومت خطا و بسیاری از پارامترهای دیگر مورد نیاز (مانند امپدانس منابع) برای محاسبه جریان بار مشخص نیست و از این رو نمی‌توان  $I_{load}$  را به‌صورت تحلیلی محاسبه کرد. برای حل این مشکل، در روش پیشنهادی این مقاله از یک فرض ساده مبنی بر برابری تقریبی مؤلفه جریان بار در زمان اتصال کوتاه با جریان بار قبل از اتصال کوتاه استفاده می‌شود. فازور جریان بار قبل از خطا را می‌توان به‌سادگی برابر با جریان عبوری از خط در چند سیکل قبل از وقوع خطا در نظر گرفت. اگرچه این فرض کاملاً منطبق بر واقعیت نیست اما تقریبی قابل قبول بوده و نه تنها روی عملکرد روش مقایسه فاز اثر منفی ندارد بلکه عملکرد آن را به‌دلایل زیر، بهبود می‌بخشد:

1- روش پیشنهادی با به‌کارگیری  $I_1$  و  $I_2$  به‌جای  $I_1'$  و  $I_2'$ ، همواره باعث کاهش اختلاف فاز میان جریان‌های دو سر خط می‌گردد. پس در خطاهای داخلی که رله‌ها باید حتماً قطع کنند، استفاده از روش پیشنهادی باعث افزایش دقت حفاظت مقایسه فاز در تشخیص این خطاها شده و هیچگاه باعث عدم عملکرد رله‌ها به اشتباه نخواهد شد.

2- مطابق شکل 4- الف، در خطاهای سه‌فاز و یا با مقاومت خطای کم، جریان اتصالی معمولاً آن‌قدر بزرگ است که جریان بار فرض شده، اثر چندانی روی فاز جریان‌های دو طرف خط ندارد. در این شرایط، روش پیشنهادی تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی عملکرد مقایسه فاز نداشته و روش مقایسه فاز به‌تنهایی نیز قادر به تشخیص محل خطا می‌باشد. اما در خطاهای تک‌فاز و یا با مقاومت خطای بزرگ، اندازه جریان بار در مقایسه با جریان اتصالی قابل توجه است (شکل 4- ب) و در این شرایط، بازسازی



شکل 3: اختلاف فاز ناشی از جریان بار.

- مقایسه زوایای سه فاز

- مقایسه فاز ترکیبی

- مقایسه فاز مجزای سیگنال‌های جریان دو سر خط

در روش مقایسه زوایای سه فاز، با استفاده از روشی مانند DFT یا فوریه، فاز سیگنال‌های جریان در هر فاز مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود و سپس اختلاف فاز جریان‌ها در دو سمت خط مقایسه شده و مبنای عملکرد رله‌ها قرار می‌گیرد. در روش مقایسه فاز ترکیبی، سیگنال‌های سه فاز به‌صورت خاصی با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا یک سیگنال واحد برای ارسال و مقایسه حاصل گردد. مزیت این روش، صرفه‌جویی اقتصادی در هزینه کانال ارتباطی است، هرچند که این روش ترکیبی در بعضی شرایط ممکن است دچار خطای عملکرد شود. در روش مقایسه فاز مجزا نیز سیگنال‌های جریان دو طرف خط به‌طور مستقیم با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این کار ابتدا سیگنال جریان به‌صورت مربعی درآمده و سپس ارسال و مقایسه می‌شود که میزان هم‌پوشانی این سیگنال‌های مربعی معیار تصمیم‌گیری روش مقایسه فاز خواهد بود (شکل 1).

روش مقایسه فاز مجزا، ساده‌ترین و از این رو متداول‌ترین روش مقایسه فاز است. اما در مقابل در روش مقایسه زوایای سه فاز می‌توان از تخمین فازور سیگنال جریان استفاده کرد و بنابراین از اطلاعات بیشتری از سیگنال‌های جریان برخوردار بود. در نتیجه، این روش انعطاف‌پذیری بیشتری برای اعمال الگوریتم‌های دلخواه و مناسب برای بهبود عملکرد طرح حفاظت مقایسه فاز را دارا می‌باشد. به‌همین دلیل در این مقاله، روش مقایسه زوایای سه فاز مورد توجه قرار گرفته است و عملکرد آن با انجام اصلاحاتی در فازور تخمینی جریان به‌گونه‌ای بهبود یافته است که قادر به تشخیص خطاهای با مقاومت بزرگ و جریان اتصالی کوچک باشد. ضمن آنکه دقت رله‌ها در تعیین نوع خطا نیز افزایش می‌یابد و این مسأله نیز موجب می‌شود که استفاده از روش مقایسه زوایای سه فاز در مقایسه با روش مقایسه فاز مجزا توجیه‌پذیر باشد. همچنین در صورت استفاده از روش مقایسه زوایای سه فاز نیاز به هم‌زمان‌سازی سیگنال‌های دو طرف وجود دارد که البته این مسأله با توجه به پیشرفت‌های چشم‌گیر تکنولوژی در زمینه ارتباطات چندکانال مشکل‌ساز نیست و به‌عنوان مثال می‌توان از سیستم GPS برای این کار استفاده کرد [1].

$$|I_2|^2 = (|I_2'| \cos \theta_2' - |I_{load}'| \cos \theta_{load}')^2 \quad (5)$$

$$+ (|I_2'| \sin \theta_2' - |I_{load}'| \sin \theta_{load}')^2$$

$$\angle I_2 = \tan^{-1} \left( \frac{|I_2'| \sin \theta_2' + |I_{load}'| \sin \theta_{load}'}{|I_2'| \cos \theta_2' + |I_{load}'| \cos \theta_{load}'} \right) \quad (6)$$

علاوه بر بهبود دقت تعیین اختلاف فاز واقعی جریان‌ها، مزیت دیگر این روش بهبود عملکرد واحدهای تشخیص وقوع خطا (FD) است. این واحدها که مطابق شکل 2 برای فعال کردن خروجی بلوک‌های مقایسه فاز به کار می‌روند، زمانی وقوع خطا را تشخیص می‌دهند که اندازه جریان خطا از حد آستانه‌ای که متنظر با وقوع اتصال در نظر گرفته می‌شود بیشتر شود. این حد آستانه به‌طور معمول حدود 2 برابر جریان نامی خط انتخاب می‌شود. در اتصالاتی با جریان خطای بزرگ، این منطق عملکرد مشکلی ندارد اما در اتصالاتی با مقاومت خطای بزرگ و یا اتصالاتی‌هایی که در سیستم‌های با منابع ضعیف رخ می‌دهند ممکن است که اندازه جریان اتصال کوتاه آن قدر کم باشد که به حد آستانه عملکرد واحدهای FD نرسد و در نتیجه حتی اگر اختلاف فاز جریان‌ها به حد آستانه تشخیص خطای داخلی هم برسد، باز هم حفاظت مقایسه فاز خطا را تشخیص نخواهد داد. ولی چنانچه از جریان‌های اتصال کوتاه تخمین زده شده توسط روش پیشنهادی به‌عنوان ورودی واحد FD نیز استفاده شود در این صورت اندازه جریان‌های محاسبه شده  $I_1$  و  $I_2$  در حالت عادی سیستم تقریباً صفر است (زیرا در حالت ماندگار، جریان اندازه‌گیری شده در محل رله‌ها همان جریان بار است)، اما در زمان اتصال کوتاه با جریان خطای کم، تقریباً برابر با جریان ناشی از اتصال خواهد بود.

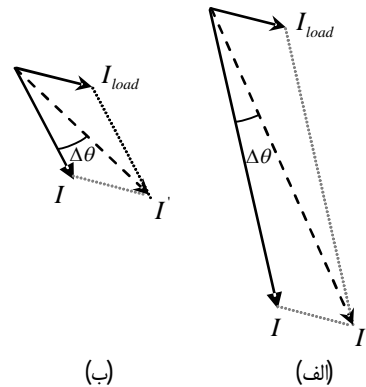
یک مثال عددی این مسأله را بهتر نشان می‌دهد. اگر به‌منظور سادگی محاسبات، فرض کنیم که جریان بار تقریباً هم‌فاز با ولتاژ بوده و جریان اتصال کوتاه تقریباً 90 درجه با ولتاژ اختلاف فاز دارد، می‌توان جریان بار و جریان اتصال کوتاه را تقریباً عمود بر یکدیگر در نظر گرفت. اگر فرض کنیم که جریان نامی خط  $2 \text{ kA}$  باشد، در روش متداول تنظیم واحد FD بایستی مقدار  $2 \times 2 = 4 \text{ kA}$  به‌عنوان حداقل مقدار حد آستانه عملکرد انتخاب شود. در این حالت اگر به‌عنوان مثال اندازه مؤلفه اتصال کوتاه  $2 \text{ kA}$  باشد، جریان کل خط تقریباً برابر خواهد بود با

$$|I'| \approx \sqrt{(|I|^2 + |I_{load}|^2)} = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2,8 \text{ kA} \quad (7)$$

که از مقدار آستانه عملکرد واحد FD کمتر است. در حالی که با روش پیشنهادی، می‌توان جریان  $2 \text{ kA}$  را با بازسازی مؤلفه جریان اتصال کوتاه از روی جریان اندازه‌گیری شده به‌دست آورد و وقوع خطا را تشخیص داد. در حالت بدون خطای سیستم، جریان محاسبه شده توسط روش پیشنهادی صفر است و در نتیجه می‌توان مثلاً با انتخاب مقدار  $1 \text{ kA}$  به‌عنوان حد آستانه عملکرد FD، حتی زمانی که جریان اتصال کوتاه عبوری از خط حدود  $2/3 \text{ kA}$  باشد - بسیار نزدیک به جریان نامی خط - نیز وقوع اتصالاتی را تشخیص داد. مقدار فوق از رابطه زیر به‌دست آمده است

$$|I'| \approx \sqrt{|I|^2 + |I_{load}|^2} = \sqrt{1^2 + 2^2} = 2,3 \text{ kA} \quad (8)$$

همان‌طور که مشخص است روش پیشنهادی، حساسیت واحد FD را نیز بسیار بیشتر کرده و لذا قابلیت اطمینان حفاظت مقایسه فاز در قطع خطاهای داخلی افزایش یافته است. باید توجه شود که در صورت استفاده از روش پیشنهادی، نمی‌توان یک واحد FD را برای هر سه فاز به کار برد و بایستی برای هر فاز از واحدهای تشخیص خطای جداگانه‌ای استفاده



شکل 4: تغییر فاز جریان در حالت‌های مختلف اتصال کوتاه، (الف) تغییر کم در فاز جریان در اتصالاتی با جریان بزرگ و (ب) تغییر زیاد در فاز جریان در اتصالاتی با جریان کوچک.

مؤلفه جریان اتصال کوتاه ( $I$ ) با فرض انجام گرفته در روش پیشنهادی باعث کاهش قابل ملاحظه اختلاف فاز جریان‌ها می‌شود. لذا در این حالت‌ها که روش اصلی مقایسه فاز قادر به تشخیص خطا نیست روش پیشنهادی خطا را تشخیص داده و عملکرد حفاظت مقایسه فاز را بهبود می‌بخشد. ضمن آنکه با کاهش اختلاف فاز جریان‌ها که با روش پیشنهادی حاصل می‌شود، می‌توان حد آستانه عملکرد بلوک‌های مقایسه فاز را مقدار کمتری انتخاب کرد که این کار، امنیت حفاظت مقایسه فاز را نیز افزایش می‌دهد.

با فرض تعیین فازور جریان بار از روی جریان عبوری از خط قبل از وقوع خطا و با اندازه‌گیری فازور جریان‌های خط در زمان اتصال کوتاه ( $I_1$  و  $I_2$ )، جریان‌های  $I_1$  و  $I_2$  را می‌توان با (1) تا (6) بازسازی کرد. در این روابط  $\theta_{load}$  و  $\theta_{load}'$  به ترتیب زوایای فازور جریان بار هستند که در ابتدا و انتهای خط اندازه‌گیری می‌شود و  $\theta_1'$  و  $\theta_2'$  نیز فاز جریان‌های ابتدا و انتهای خط هستند. این مقادیر با الگوریتم فوریه تمام سیکل تخمین زده می‌شوند. بنابراین مبدأ زمانی فیلترهای فوریه در دو سر خط بایستی تا حد امکان، هم‌زمان باشند تا فاز همه جریان‌ها با یک مبدأ زمانی مشترک تعیین شود. همچنین باید دقت شود که  $I_{load}'$ ، جریانی است که رله انتهای خط به‌عنوان جریان بار اندازه‌گیری می‌کند و با توجه به جهت مرجع جریان برای رله 2، برابر با  $-I_{load}$  است

$$I_1 = I_1' - I_{load} \quad (1)$$

$$I_1' = |I_1'| (\cos \theta_1' + j \sin \theta_1')$$

$$I_{load} = |I_{load}| (\cos \theta_{load} + j \sin \theta_{load})$$

بنابراین خواهیم داشت

$$|I_1|^2 = (|I_1'| \cos \theta_1' - |I_{load}| \cos \theta_{load})^2 \quad (2)$$

$$+ (|I_1'| \sin \theta_1' - |I_{load}| \sin \theta_{load})^2$$

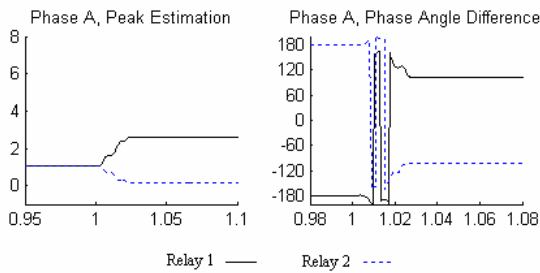
$$\angle I_1 = \tan^{-1} \left( \frac{|I_1'| \sin \theta_1' - |I_{load}| \sin \theta_{load}}{|I_1'| \cos \theta_1' - |I_{load}| \cos \theta_{load}} \right) \quad (3)$$

به طور مشابه برای جریان  $I_2$  نیز خواهیم داشت

$$I_2 = I_2' - I_{load} = I_2' - (-I_{load}) \quad (4)$$

$$I_2' = |I_2'| (\cos \theta_2' + j \sin \theta_2')$$

$$I_{load} = |I_{load}| (\cos \theta_{load} + j \sin \theta_{load})$$



شکل 7: خطای تک‌فاز AG با مقاومت خطای 120 اهم.

استفاده می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری و تأخیر کانال ارتباطی به ترتیب برابر با 4 کیلوهرتز و 2 میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

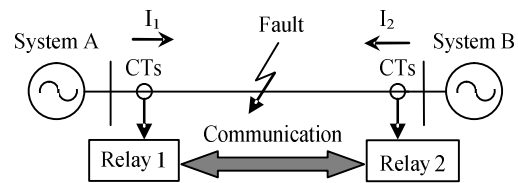
خطاهای تک‌فاز بیشترین تعداد خطاها را تشکیل می‌دهند و به دلیل اختلاف فاز بیشتر نسبت به خطاهای دوفاز و سه‌فاز، معمولاً بدترین حالت برای حفاظت مقایسه فاز نیز محسوب می‌شوند. به همین دلیل به جز در شکل 10، در سایر حالت‌ها فقط خطاهای تک‌فاز AG مورد بررسی قرار گرفته است.

#### 4-1 شبیه‌سازی روش متداول مقایسه سه‌فاز

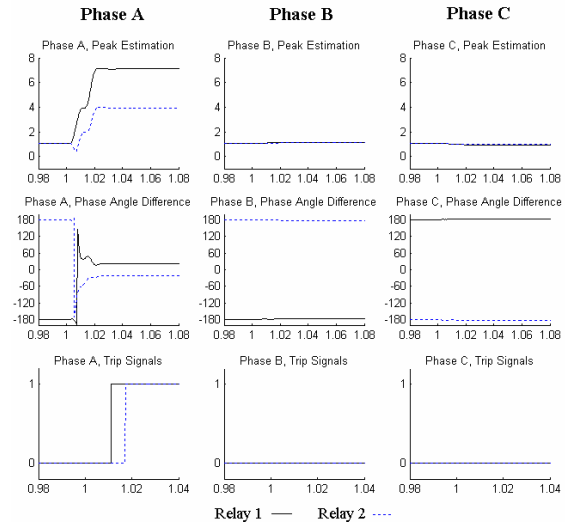
برای نشان دادن تأثیر روش پیشنهادی روی عملکرد حفاظت مقایسه فاز، ابتدا عملکرد روش متداول مقایسه زوایای سه‌فاز نشان داده می‌شود. در شکل 6 وقوع خطای تک‌فاز در 50 کیلومتری از ابتدای خط با مقاومت خطای 5 اهم فرض شده است. در این شکل، اندازه جریان‌ها و اختلاف فاز میان آنها در دو طرف خط به همراه وضعیت سیگنال قطع رله‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در این حالت که جریان خطا نسبت به جریان بار مقدار بزرگی دارد، اختلاف فاز کمی (21 درجه) میان جریان‌های دو طرف وجود دارد و در نتیجه سیستم‌های حفاظتی در دو طرف خط، خطا را به درستی در فاز A تشخیص داده و فرمان قطع را صادر کرده‌اند. بایستی توجه کرد که در این حالت بخش عمده اختلاف فاز میان جریان‌های دو طرف، ناشی از اختلاف فاز میان منابع بوده است. همچنین با توجه به شکل مشخص است که اندازه جریان پس از خطا فقط در فاز A افزایش چشم‌گیر یافته است و در سایر فازها تغییر جریان چندان زیاد نیست.

با افزایش مقاومت خطا و کاهش جریان اتصال کوتاه، اختلاف فاز میان جریان‌های دو طرف خط افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال با مقاومت خطای 100 و 120 اهم، به ترتیب اختلاف فاز 50 و 102 درجه میان جریان‌های دو طرف ایجاد می‌شود. باید توجه کرد که اگرچه این مقادیر برای مقاومت خطا، خیلی بزرگ است و به ندرت پیش می‌آید، اما وقوع آنها غیرممکن نیست. به‌عنوان مثال در اثر برخورد یکی از فازهای خط انتقال به یک درخت و آتش گرفتن آن، می‌توان چنین مقاومتی را در لحظات اولیه خطا داشت. ضمن آنکه در این شبیه‌سازی به دلیل آنکه منابع دو طرف خط بسیار قوی بوده‌اند، نیاز به چنین مقاومتی وجود داشته است و ما صرفاً برای بررسی عملکرد حفاظت مقایسه فاز در شرایط اتصالی با جریان خطای کوچک از چنین مقاومتی استفاده کرده‌ایم. مسلماً در سیستم‌های واقعی و با منابع ضعیف‌تر، مقاومت‌های خطای کوچک‌تر و در حد چند ده اهم نیز می‌تواند باعث ایجاد اختلاف فاز بزرگ میان جریان‌ها شود.

شکل 7 نحوه عملکرد رله‌ها در فاز A را به‌ازای وقوع اتصالی با مقاومت خطای 120 اهم نشان می‌دهد. با توجه به شکل اگرچه واحد FD در رله 1 هنوز قادر به تشخیص وقوع خطا است، اما به دلیل بیشتر بودن اختلاف فاز میان جریان‌ها از حد آستانه واحدهای مقایسه فاز، رله‌ها قادر



شکل 5: سیستم مورد مطالعه.

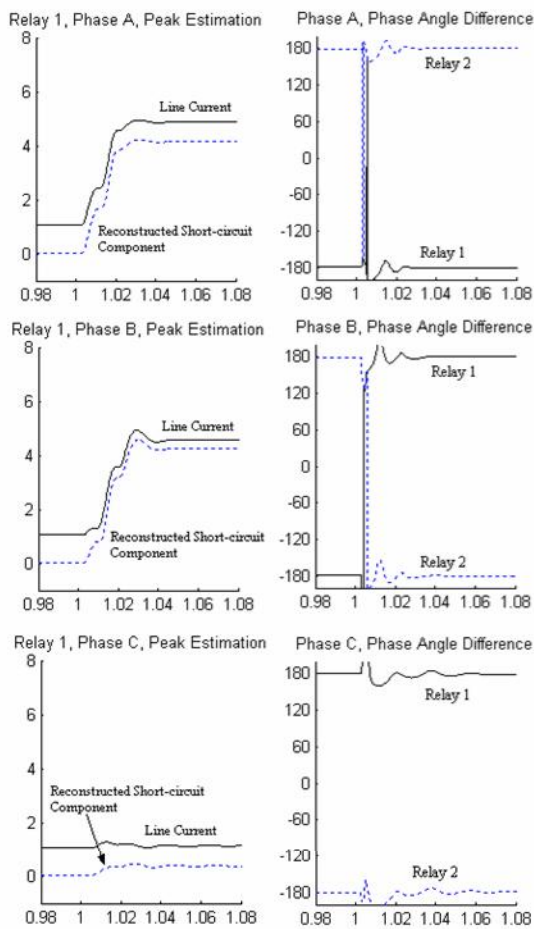


شکل 6: خطای تک‌فاز AG با مقاومت خطای 5 اهم.

شود. البته با توجه به قابلیت‌های فراوان رله‌های دیجیتال این مسأله نه تنها از نظر نرم‌افزاری پیچیدگی چندانی را به سیستم حفاظتی تحمیل نمی‌کند، بلکه خود باعث افزایش دقت در تشخیص نوع خطا (فازهای اتصالی‌شده) می‌گردد، زیرا با استفاده از واحدهای FD مجزا، در فازهای سالم اندازه جریان تخمینی تغییر چندانی نداشته و در عوض تغییر اندازه جریان فقط در فازهای خطادار قابل توجه و قابل تشخیص می‌باشد. این مسأله در کنار اختلاف فاز تقریباً 180 درجه‌ای میان جریان‌های دو سر خط در فازهای سالم باعث می‌شود که فازهای خطادار با دقت بسیار زیادی قابل تعیین باشند. این مزیت روش پیشنهادی خصوصاً در طرح‌های حفاظتی مبتنی بر بازبست تک‌فاز که نیاز به تشخیص دقیق و مطمئن فاز معیوب دارند بسیار مفید است.

#### 4-2 شبیه‌سازی

روش پیشنهادی در سیستم نمونه شکل 5 شبیه‌سازی شده است. این سیستم شامل یک خط انتقال به طول 150 کیلومتر است که با استفاده از روش مقایسه زوایای سه فاز حفاظت می‌شود. پارامترهای سیستم در پیوست مقاله آمده است [23]. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای PSCAD/EMTDC و MATLAB انجام شده است. اندازه جریان عبوری از خط در حالت عادی، (Peak) 1 kA است و در نتیجه، حد آستانه فعال شدن واحدهای FD در روش متداول مقایسه فاز برابر با 2 kA در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که در صورت استفاده از روش پیشنهادی، جریان ورودی به واحدهای FD در حالت عادی شبکه صفر است و از این رو برای تنظیم واحدهای FD در روش پیشنهادی می‌توان از مقدار کمی مانند 0.5 kA استفاده کرد. حد آستانه فعال شدن واحدهای مقایسه فاز نیز 60 درجه در نظر گرفته شده است. برای تخمین اندازه و فاز مؤلفه جریان بار در هر لحظه زمانی در روش پیشنهادی، از متوسط نمونه‌های محاسبه‌شده در سیکل متناظر با نیم‌ثانیه قبل از آن زمان

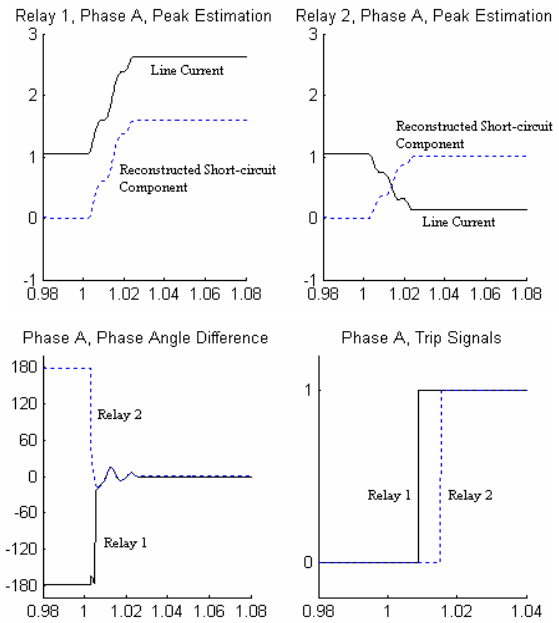


شکل 10: عملکرد روش پیشنهادی در خطای خارجی AB با مقاومت خطای 5 اهم.

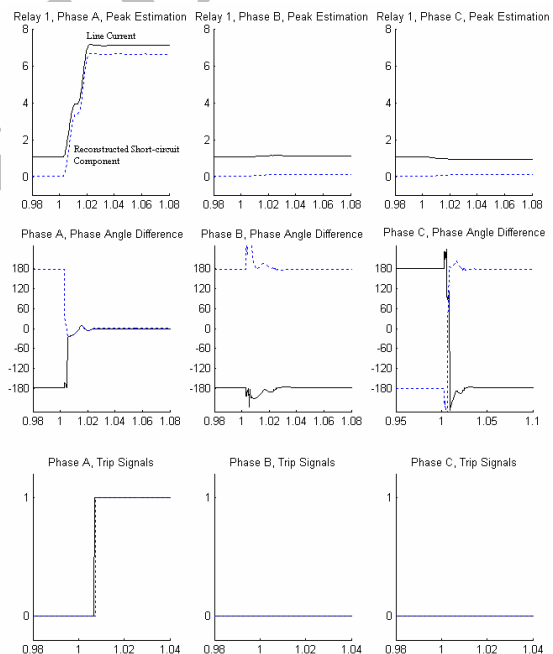
20 درجه‌ای تغییر می‌کند و سپس به صفر می‌رسد و در نتیجه داخلی بودن خطا به‌سادگی قابل تشخیص می‌باشد. ضمن آنکه اندازه مؤلفه‌های بازسازی شده اتصال کوتاه در رله 2 نیز از حد آستانه واحد FD بزرگ‌تر است و لذا رله 2 نیز وقوع خطا را تشخیص می‌دهد (برخلاف شکل 7). ضمن آنکه هر دو رله، خطا را در کمتر از یک سیکل تشخیص داده‌اند و بنابراین روش پیشنهادی خطا را علاوه بر دقت زیاد، با سرعت خوبی نیز تشخیص می‌دهد.

از طرف دیگر در شکل 9 عملکرد روش پیشنهادی به‌ازای وقوع خطای تک‌فاز با مقاومت خطای کوچک 5 اهم (مشابه با شکل 6) شبیه‌سازی شده است. مطابق نمودارهای ردیف اول در این شکل، بر خلاف حالت قبل تفاوت اندازه جریان خطا و جریان بازسازی شده توسط روش پیشنهادی - که برای رله 1 نشان داده شده است - چندان زیاد نیست و این به‌دلیل بزرگ‌بودن مؤلفه اتصال کوتاه در مقایسه با مؤلفه جریان بار در این حالت می‌باشد. بنابراین روش پیشنهادی در جریان‌های اتصالی با دامنه بزرگ نیز عملکردی صحیح دارد. اختلاف فاز میان جریان‌ها پس از وقوع اتصالی نیز با استفاده از روش پیشنهادی باز هم کاهش یافته و به صفر رسیده است که به افزایش دقت حفاظت مقایسه فاز کمک می‌کند.

در ادامه برای نشان‌دادن صحت عملکرد روش پیشنهادی در خطاهای خارجی، شکل 10 را در نظر می‌گیریم که در آن، خطای خارجی AB در نزدیکی رله 2 شبیه‌سازی شده است. در اینجا نیز شاهد عملکرد درست رله‌ها هستیم، چرا که اختلاف فاز میان جریان‌های دو طرف خط در هر سه فاز حدود 180 درجه (مقدار مورد انتظار برای خطای خارجی) می‌باشد. در سایر شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در حالت‌های مختلف که با تغییر مقاومت خطا، محل خطا و سایر پارامترهای مؤثر همراه بوده است نیز



شکل 8: عملکرد روش پیشنهادی در اتصالی با مقاومت خطای 120 اهم.

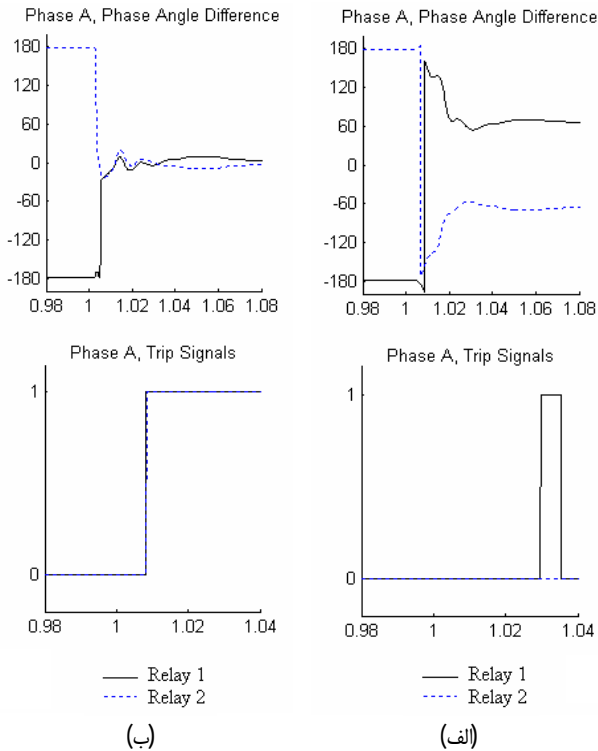


شکل 9: عملکرد روش پیشنهادی در اتصالی با مقاومت خطای 5 اهم.

به تشخیص خطا نیستند. ضمن آنکه واحد FD در رله 2 نیز اصولاً قادر به تشخیص وقوع خطا نیست و در نتیجه، سیستم حفاظتی دچار عملکرد اشتباه خواهد شد.

#### 2-4- شبیه‌سازی روش مقایسه فاز پیشنهادی

شکل 8 عملکرد روش پیشنهادی را در فاز A به‌ازای همان خطای تک‌فاز با مقاومت 120 اهم نشان می‌دهد. نمودارهای ردیف اول در شکل 8، مقدار پیک جریان خطا و مؤلفه اتصال کوتاه تخمین زده شده (بازسازی شده) توسط روش پیشنهادی را نشان می‌دهد و نمودارهای پایینی نشان‌دهنده اختلاف فاز میان مؤلفه‌های اتصالی فاز A در دو طرف خط (محاسبه‌شده توسط روش پیشنهادی) و وضعیت سیکنال قطع رله‌ها است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاف فاز تخمین زده شده میان مؤلفه‌های اتصال کوتاه کاهش قابل توجهی یافته است به‌طوری که مقدار اختلاف فاز محاسبه‌شده، تنها برای یک زمان گذرا در محدوده تقریباً



شکل 11: عملکرد روش پیشنهادی در اتصالی با مقاومت 250 اهم.

جدول 1: نتایج به‌دست آمده برای اتصال کوتاه AG در 50 کیلومتری از ابتدای خط.

| نوع خط (مقاومت خط بر حسب اهم) | اختلاف فاز میان جریان‌ها (درجه) | اندازه جریان اتصالی (kA) | مؤلفه بازسازی شده خط (kA) |       |       |       | زمان عملکرد (ms) |            |       |              |            |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|------------------|------------|-------|--------------|------------|
|                               |                                 |                          | رله 1                     | رله 2 | رله 1 | رله 2 | روش پیشنهادی     | روش متداول | رله 1 | رله 2        |            |
| AG (5)                        | 21                              | 7,1                      | 3,9                       | 6,6   | 4,3   | 12    | 18               | 7          | 8     | روش پیشنهادی | روش متداول |
| AG (25)                       | 22                              | 5,7                      | 2,4                       | 4,9   | 3,2   | 18    | 21               | 7          | 8     | روش پیشنهادی | روش متداول |
| AG (50)                       | 25                              | 4,3                      | 1,2                       | 3,3   | 2,1   | 19    | -                | 8          | 9     | روش پیشنهادی | روش متداول |
| AG (75)                       | 31                              | 3,4                      | 0,6                       | 2,4   | 1,5   | 21    | -                | 8          | 10    | روش پیشنهادی | روش متداول |
| AG (100)                      | 50                              | 2,9                      | 0,3                       | 1,9   | 1,2   | 28    | -                | 9          | 15    | روش پیشنهادی | روش متداول |
| AG (130)                      | 132                             | 2,5                      | 0,15                      | 1,4   | 0,9   | -     | -                | 9          | 16    | روش پیشنهادی | روش متداول |

شکل 12: اختلاف فاز میان جریان‌ها و وضعیت فرمان قطع رله‌ها در فاز خط‌دار در اتصالی با مقاومت خطی 20 اهم، (الف) روش متداول مقایسه فاز و (ب) روش پیشنهادی.

کوتاهی تشخیص داده است و این مسأله بار دیگر قدرت زیاد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در اینجا بایستی تأکید شود که هدف از انتخاب چنین مقاومت بسیار بزرگی که در عمل امکان‌پذیر نیست، تنها بررسی عملکرد روش پیشنهادی در بدترین حالت ممکن خطاست که نتیجه به‌دست آمده، حاکی از عملکرد صحیح روش پیشنهادی می‌باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مشخص است که عملکرد حفاظت مقایسه فاز با استفاده از روش پیشنهادی بهبود قابل توجهی یافته است. مزیت روش پیشنهادی این است که فاقد محاسبات پیچیده بوده و به‌سادگی قابل پیاده‌سازی است چرا که روش پیشنهادی تنها از یک فرض ساده مبنی بر ثابت بودن مؤلفه جریان بار در طی زمان قبل و بعد از خطا استفاده کرده است و مؤلفه مربوط به جریان اتصال کوتاه را با دقت قابل قبولی تخمین زده است.

#### 4-3 حفاظت خط جبران‌شده با خازن سری

یکی از حالت‌های مشکل در حفاظت خطوط انتقال، حفاظت خط جبران‌شده با خازن سری می‌باشد. به دلیل مشکلات متعددی مانند کوچک شدن برد حفاظتی و معکوس شدن ولتاژ و جریان در نتیجه حضور خازن سری خط، مناسب‌ترین راه برای حفاظت این گونه خطوط، استفاده از روش‌های حفاظت واحد است. اگرچه حفاظت واحد برای خطوط جبران‌شده را می‌توان با استفاده از رله‌های دیستانس نیز انجام داد اما به‌کارگیری حفاظت مقایسه فاز به دلیل آنکه فقط از اطلاعات جریان خط استفاده می‌کند راحت‌تر است. در این قسمت از مقاله، حفاظت مقایسه فاز در خط جبران‌شده با خازن سری شبیه‌سازی شده است تا عملکرد روش پیشنهادی در حالتی دیگر از سیستم نیز ارزیابی شود.

شکل 12 وقوع خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت خطی 20 اهم در فاز A را نشان می‌دهد. پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده، مشابه سیستم قبل است با این تفاوت که طول خط در این حالت 300 کیلومتر فرض

روش پیشنهادی همواره جواب صحیح داشته است که برای جلوگیری از ازدیاد حجم مقاله، از نمایش آنها صرف نظر شده است و تنها، نتایج برخی از شبیه‌سازی‌ها در جدول 1 نشان داده شده است.

در بخش مربوط به تشریح روش پیشنهادی، به مزیت دیگر آن مبنی بر افزایش حساسیت واحدهای FD نیز اشاره گردیده بود. برای اثبات این مسأله، شکل 11 را در نظر می‌گیریم که وقوع خطای تک‌فاز با مقاومت خطی بسیار بزرگ 250 اهم را نشان می‌دهد که در نتیجه آن، جریان خطای کوچکی ایجاد شده است که حتی از مقدار 2 kA که سطح آستانه فعال شدن واحد FD در روش اصلی مقایسه فاز است کمتر می‌باشد. ضمن آنکه اختلاف فاز میان جریان‌های دو طرف خط در این حالت برابر با 175 درجه است. در نتیجه حفاظت مقایسه فاز نه تنها قادر به تشخیص داخلی یا خارجی بودن خطا نیست، بلکه اصولاً قادر به تشخیص وقوع خطا نیز نمی‌باشد. این در حالی است که با استفاده از روش پیشنهادی، اندازه مؤلفه بازسازی شده اتصال کوتاه، کمی بالاتر از حد آستانه واحدهای FD - که در این حالت برابر با 0,5 kA است - به‌دست می‌آید و علاوه بر آن، اختلاف فاز میان جریان‌ها در فاز A پس از وقوع اتصالی باز هم به حدود صفر درجه می‌رسد. بنابراین روش پیشنهادی حتی در این حالت بسیار بد که نه تنها حفاظت مقایسه فاز، بلکه بسیاری از روش‌های حفاظتی دیگر نیز قادر به تشخیص خطا نیستند، خطا را به‌سادگی و در مدت زمان

جدول 3: پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده.

| مشخصات منابع      |  |
|-------------------|--|
| 50                | فرکانس (Hz)  |
| 400               | ولتاژ مینا (kV)  |
| 500               | توان مینا (MVA)  |
| $1,3 + j15$       | امپدانس توالی مثبت ( $\Omega$ )                          |
| $2,3 + j26,6$     | امپدانس توالی صفر ( $\Omega$ )                           |
| مشخصات خط         |  |
| $0,0275 + j0,315$ | امپدانس توالی مثبت ( $\Omega/\text{km}$ )                |
| $0,275 + j1,0267$ | امپدانس توالی صفر ( $\Omega/\text{km}$ )                 |
| 244/85            | سوسپتانس توالی مثبت ( $\text{M}\Omega \cdot \text{km}$ ) |
| 374/5             | سوسپتانس توالی صفر ( $\text{M}\Omega \cdot \text{km}$ )  |

### 5- نتیجه‌گیری

جریان بار، بزرگ‌ترین مشکل حفاظت مقایسه فاز است. در خطاهای با جریان اتصال کم، اندازه جریان بار در مقایسه با مؤلفه اتصال کوتاه قابل توجه است و اختلاف فاز زیادی میان جریان‌ها ایجاد می‌کند. اما روش پیشنهادی در این مقاله با حذف مؤلفه جریان بار از جریان خطا، امکان تخمین مؤلفه‌های اتصال کوتاه را با دقت خوبی فراهم می‌آورد. روش پیشنهادی در خطاهای با جریان اتصال کوچک که حفاظت مقایسه فاز قادر به تشخیص خطا نیست با استفاده از مؤلفه‌های بازسازی شده اتصال کوتاه، داخلی یا خارجی بودن خطا را با دقت زیاد تشخیص می‌دهد. همچنین با حذف اثر جریان بار از جریان خطا می‌توان واحدهای تشخیص خطا را نیز حساس‌تر ساخت و وقوع خطاهای با جریان اتصال خیلی کم را نیز تعیین کرد و این، مزیت دیگر روش پیشنهادی است. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهند که عملکرد روش مقایسه فاز با استفاده از روش پیشنهادی بهبود قابل توجهی یافته است. روش پیشنهادی فاقد محاسبات پیچیده بوده و به‌سادگی قابل پیاده‌سازی است و از این رو می‌توان آن را به‌عنوان روشی عملی برای بهبود حفاظت خطوط انتقال در نظر گرفت.

### پیوست

پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده در جدول 3 آمده است.

### مراجع

- [1] J. W. Dzienusko, "Modern trends in line and network protection systems," in *Proc.IEE Conf. Developments in Power System Protection*, no. 479, pp. 177-180, Apr. 2001.
- [2] J. A. Jiang, C. W. Liu, and C. S. Chen, "A novel adaptive PMU-based transmission line relay: design and EMTP simulation results," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 4, pp. 930-937, Oct. 2002.
- [3] D. Novosel, A. Phadke, M. M. Saha, and S. Lindahl, "Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines," in *Proc.IEE Conf. Developments in Power System Protection*, no. 434, pp. 18-23, Mar. 1997.
- [4] A. A. Burzese, et al, "Pilot relaying performance analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 1, pp. 85-102, Jan. 1990.
- [5] Y. Ge, A. Wang, and H. Tao, "Phase-comparison pilot relays using fault superimposed components," in *Proc. IEE Int. Conf. Adv. Power Syst. Contr. Oper. Manage.*, vol. 2, pp. 833-838, Nov. 1991.
- [6] M. S. Sachdev, et al, "Advancements in microprocessor based protection and communication," *IEEE Power Engineering Society, Tutorial Text*, no. 97TP120-0, 1997.
- [7] L. J. Ernst, W. L. Hinman, D. H. Quam, and J. S. Thorp, "Charge comparison protection of transmission lines: relaying concepts," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 4, pp. 1834-1852, Oct. 1992.

جدول 2: زمان عملکرد روش‌های مختلف برای اتصال کوتاه AG در وسط خطا.

| مقاومت خطا (اهم) | زمان عملکرد روش (میلی‌ثانیه) |      |      |
|------------------|------------------------------|------|------|
|                  | DCB                          | PUTT | POTT |
| 5                | 14                           | 15   | 15   |
| 25               | 18                           | 22   | 22   |
| 50               | 24                           | 223  | 223  |
| 75               | -                            | -    | -    |

شده است و برای جبران امپدانس سلفی خطا، از خازن سری با درصد جبران 70% استفاده گردیده است. تجهیزات حفاظتی خازن شامل MOV نیز مدل‌سازی شده است. مطابق شکل 12-الف که اختلاف فاز میان جریان‌ها و وضعیت فرمان قطع رله‌های دو طرف در فاز خطادار (A) را با توجه به روش متداول مقایسه فاز نشان می‌دهد، اختلاف فاز نسبتاً زیادی (حدود 60 درجه) میان جریان‌ها ایجاد شده است که در نتیجه، تشخیص وقوع خطا برای رله‌ها امکان‌پذیر نیست و اختلاف فاز ایجاد شده، تنها در رله 1 و برای مدتی کوتاه کمتر از حد آستانه واحد بوده است. در حالی که مطابق شکل 12-ب و در حالتی که از روش پیشنهادی استفاده شده است، اختلاف فاز کمی میان جریان‌ها وجود دارد که در نتیجه آن، رله‌ها وقوع خطا را به‌سادگی و در زمانی کوتاه تشخیص داده‌اند.

مطابق شبیه‌سازی انجام شده در این قسمت و سایر نتایجی که برای خط جبران شده سری به‌دست آمده‌اند - و از ارائه آنها در اینجا صرف نظر شده است - روش پیشنهادی در خط جبران شده با خازن سری نیز عملکرد صحیح دارد و در این حالت نیز قابل استفاده است. مطالعات بیشتر در زمینه استفاده از روش پیشنهادی برای حفاظت خطوط جبران شده در حال حاضر توسط نویسندگان این مقاله در حال انجام است که با تکمیل مطالعات و دستیابی به نتایج مفصل‌تر و دقیق‌تر، این نتایج در مقاله دیگری ارائه خواهد شد.

### 4-4 مقایسه با سایر روش‌های حفاظت واحد

جدول 2، نتیجه چند شبیه‌سازی نمونه برای مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با تعدادی از روش‌های حفاظت واحد مبتنی بر رله‌های امپدانس را نشان می‌دهد که شامل روش‌های  $DCB^1$ ،  $PUTT^2$  و  $POTT^3$  می‌باشند [24]. شبیه‌سازی‌ها برای خطای AG در وسط خط و به‌ازای مقاومتهای خطای مختلف انجام شده است. همان‌طور که دیده می‌شود زمان عملکرد روش‌های حفاظت واحد مبتنی بر رله‌های دیستانس در این خط به‌ازای مقاومتهای خطای کوچک (5 و 25 اهم) در حدود 14 تا 22 میلی‌ثانیه است که کمی بیشتر از زمان عملکرد روش پیشنهادی می‌باشد. اما با افزایش مقاومت خطا به 50 اهم، زمان عملکرد برای روش‌های  $PUTT$  و  $POTT$  افزایش زیادی یافته است که ناشی از خروج امپدانس اندازه‌گیری شده از ناحیه سریع رله دیستانس و عملکرد رله‌ها در ناحیه 2 می‌باشد. همچنین با افزایش مقاومت خطا به 75 اهم و بالاتر که معادل با جریان اتصال کوچک است، امپدانس دیده‌شده کاملاً از مشخصه زون‌های رله‌ها خارج می‌شود و روش‌های حفاظت واحد مبتنی بر رله‌های امپدانس قادر به تشخیص خطا نیستند. در حالی که روش پیشنهادی در مقاومت خطای بزرگ نیز عملکرد صحیح داشته است.

1. Directional Comparison Blocking
2. Permissive Underreach Transfer Trip
3. Permissive Overreach Transfer Trip



- [20] M. Akke and J. S. Thorp, "Some improvements in the three-phase differential equation algorithm for fast transmission line protection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 1, pp. 66-72, Jan. 1998.
- [21] C. K. Wong, C. W. Lam, K. C. Lei, C. S. Lei, and Y. Han, "Novel wavelet approach to current differential pilot relay protection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 1, pp. 20-25, Jan. 2003.
- [22] IEEE Power System Relaying Committee Working Group, "Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines," *IEEE Committee Report, IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 1, pp. 182-192, Jan. 1992.
- [23] M. M. Saha, B. Kasztenny, E. Rosolowski, and J. Izykowski, "First zone algorithm for protection of series compensated lines," *IEEE Tran. Power Del.*, vol. 16, no. 2, pp. 200-207, Apr. 2001.
- [24] T. S. Sidhu and M. Khederzadeh, "Series compensated line protection enhancement by modified pilot relaying schemes," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, pp. 1194-1198, Jul. 2006.
- [8] C. Cagnon and P. Gravel, "Extensive evaluation of high performance protection relays for the hydro - québec series compensated network," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 4, pp. 1799-1811, Oct. 1994.
- [9] W. A. Elmore, "Current differential and phase comparison relaying compared with pilot distance schemes," in *Proc. 25th Annual Western Protective Relay Conf.*, pp. 10-16, Oct. 1998.
- [10] P. Ye, K. K. Li, D. S. Chen, and A. K. David, "Intelligent phase comparison carrier protection," in *Proc. IEE Conf. Developments in Power System Protection*, no. 434, pp. 295-298, Mar. 1997.
- [11] S. Ward, "Phase comparison protection operating over power line carrier," in *Proc. 55th Texas A & M Conf. Protective Relaying Engineers*, pp. 1-5, Apr. 2002.
- [12] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power System*, New York: John Wiley, 1988.
- [13] M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, I. Uttamchandani, and W. O. Kennedy, "Design of phase and amplitude comparators for transmission line protection," in *Proc. IEEE Conf. on Communications, Power and Computing*, pp. 179-184, May 1997.
- [14] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying*, 2nd ed., London, U. K., Research Studies, 1995.
- [15] A. T. Johns and S. K. Salman, *Digital Protection for Power System*, U. K.: Peter Peregrinus, 1995.
- [16] A. K. S. Chaudhary, K. S. Tam, and A. G. Phadke, "Protection system representation in the electromagnetic transient program," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 2, pp. 700-711, Apr. 1994.
- [17] Y. Liao and S. Elangovan, "Digital distance relaying algorithm for first-zone protection for parallel transmission lines," in *Proc. Inds. Elect. Eng. Gener. Transm. Distri.*, vol. 145, pp. 531-536, Sept. 1998.
- [18] R. K. Aggarwal and A. T. Johns, "A differential line protection scheme for power system based on composite voltage and current measurement," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 3, pp. 1595-1601, Jul. 1989.
- [19] L. Jie, S. Elangovan, and J. B. X. Devotta, "Adaptive travelling wave protection algorithm using two correlation functions," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 1, pp. 126-131, Jan. 1999.

مجید صنایع‌پسند در سال 1367 مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران دریافت نموده و تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری به ترتیب در سالهای 1373 و 1377 تکمیل نموده است. دکتر صنایع‌پسند از سال 1377 در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران مشغول فعالیت گردید و اکنون نیز عضو هیات علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، پایداری سیستم‌های قدرت و کاربرد روشهای هوش مصنوعی می‌باشد و از ایشان در این زمینه‌ها مقالات متعددی به چاپ رسیده است.

میثم جعفری نوکندی در سال 1382 مدرک کارشناسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نموده و در سال 1384 موفق به اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق از دانشگاه تهران گردیده است. نام‌برده در حال حاضر، دانشجوی دکتری مهندسی برق در دانشگاه تهران است. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی شامل برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته و قابلیت اطمینان و حفاظت سیستم‌های قدرت می‌باشد.

Archive of SID